Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
Direktor: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Entwicklung eines statischen low-cost Fourier-Transformations-Spektrometers für den sichtbaren Wellenlängenbereich

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Oliver Buse

geboren am 1. Dezember 1977 in Langenhagen

2010

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. L. Rissing

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer

Prüfungstermin: 8.9.2010

Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Oliver Buse

Entwicklung eines statischen low-cost Fourier-Transformations-Spektrometers für den sichtbaren Wellenlängenbereich

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2010

Umschlag:
Das Hintergrundbild zeigt eine Kollage vom Institutsgebäude an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover aus verschiedenen Zeitepochen.
Gestaltung: K. Salfeld

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9505-9
ISSN 1615-7184

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrassistent am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Ich danke dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier für die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit und die Übernahme des Erstreferats, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing vom Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) für die Übernahme des Zweitreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing Ludger Overmeyer vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) danke ich für die spontane Übernahme des Vorsitzes am Tag der Prüfung.

Mein besonderer Dank gilt dem Oberingenieur des Instituts Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Math. Taras Vynnyk für die stets vorhandene Hilfsbereitschaft bei der Lösung zahlreicher mathematischer und programmiertechnischer Fragestellungen, sowie allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern für die angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre.

Kurzfassung

In der optischen Messtechnik und der mobilen Analytik werden zunehmend Mikrospektrometer eingesetzt, die moderate Auflösungen von einigen Nanometern im sichtbaren Wellenlängenbereich zu einem günstigen Preis bei einer kompakten Baugröße ermöglichen und im Gegensatz zu klassischen Fourier-Transformations-Spektrometern (FTS) keine bewegten Teile beinhalten. Diese und andere Vorteile lassen sich kombinieren, indem die bewegten Komponenten eines FT-Spektrometers durch statische ersetzt werden, wodurch sich ein robuster Aufbau realisieren lässt. Zusätzlich kann so eine weitere Miniaturisierung erzielt werden.

Mit Hilfe eines Ultrapräzisionsbearbeitungsverfahren ist ein 13 mm x 13 mm großer Mikrospiegel, bestehend aus 13 Stufen, hergestellt worden, der Kern des entwickelten, statischen Fourierspektrometers ist und der Erzeugung des Detektorsignals in Form eines räumlichen Interferogramms dient. Die Versuchsanordnung beruht dabei auf einem klassischen Michelson-Interferometer-Aufbau mit Eingangsoptik, Strahlteiler, Referenz- und Mikrospiegel, sowie einem CCD-Array zur Aufnahme des entstehenden Interferenzsignals. Durch den Einsatz eines geeigneten Kalibrierverfahrens mit verschiedenen Lasern lässt sich aus dem räumlichen Interferenzsignal durch Stitching und Korrelation der einzelnen Stufen ein kontinuierliches Signal zusammensetzen, aus dem sich, nach geeigneter Signalfilterung und -fensterung, mit Hilfe der Fouriertransformation das gesuchte Spektrum berechnen lässt.

Das entwickelte statische Fourierspektrometer eignet sich aufgrund der fehlenden bewegten Komponenten insbesondere zur Untersuchung von Kurzzeitprozessen und ermöglicht im sichtbaren Wellenlängenbereich Auflösungen und Wellenlängen-genauigkeiten, die mit günstigen Mikro-Gitterspektrometern durchaus konkurrieren können.

Stichworte: statisches Fourier-Transformations-Spektrometer (SFTS), Mikrospiegel, Ultrapräzisionsbearbeitung, flächiges Interferogramm, Stitching

Abstract

The use of the microspectrometer is increasing when it comes to the optical metrology or mobile analytics. This offers a more affordable price for a moderate resolution of some nanometers in the visible wavelength range. Compared to the traditional Fourier transform spectrometers (FT), the developed one contains no moving parts, this allows a robust assembly to be achieved. These facts and other advantages can be combined by replacing moving components of a FT-spectrometer with static ones to realize a static FT-spectrometer (SFTS). As a result of this further miniaturization can be achieved.

With the help of a ultraprecision machining process, a 13 mm x 13 mm micro-mirror, which was formed out of 13 steps, was produced. This is the center of the developed, static Fourier transform spectrometer and functions as a interference signal generator. The test arrangement is based on a traditional Michelson interferometer with an optical aperture, a beamsplitter, a reference and micro-mirror, as well as a CDD-array to record the relevant interference signal. By using a suitable calibration procedure with different lasers, a continuous signal can be developed, by stitching and correlation the steps. After appropriate signal filtering the desired spectrum can be calculated with the help of the Fourier transform.

Because of the missing moving components, the developed static Fourier transform spectrometer is especially suitable to test short-term processes. In addition, it facilitates in the visible wavelength range a resolution and a wavelength accuracy which is able to compete with micro grating spectrometers.

Keywords: static Fourier transform spectrometer (SFTS), micro-mirror, ultraprecision machining, 2-dimensional interference pattern, stitching

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung....1
1.1 Zielsetzung....2
1.2 Aufbau der Arbeit....2
2 Stand der Technik....4
2.1 Einsatz von Spektrometern....4
3 Theoretische Grundlagen....12
3.1 Grundlagen der Fouriertransformation....12
3.2 Diskrete Fouriertransformation....13
3.2.1 Fehlerquellen der diskreten Fouriertransformation....15
3.2.2 Leakage-Effekt....16
3.3 Einführung in die Spektralanalyse....21
3.4 Grundlagen ausgewählter Spektrometerarten....24
3.4.1 Spektrale Auflösung....24
3.4.2 Prismenspektrometer....25
3.4.3 Gitterspektrometer....29
3.4.4 Fourier-Transformations-Spektrometer....33
3.5 Statische Fourier-Transformations-Spektrometer....39
3.5.1 Aufbau und Funktionsweise....40
3.5.2 Spiegelsystem-Detektor-Kombination....44
3.5.3 Signal-Rausch-Verhältnis....48
3.6 Funktionsprinzipien statischer Fourier-Transformations-Spektrometer....50
3.6.1 Polarisationsinterferometer....51
3.6.2 Sagnac-Interferometer....52
3.6.3 Lloyd- und Doppelspiegel-Anordnung....53
3.6.4 Michelson-Anordnung....53
3.6.5 Motivation und Potential des SFT-Spektrometers....54

3.6.6 Kohärenzlänge als limitierender Faktor der FT-Spektroskopie.....56
4 Experimenteller Aufbau.....58
4.1 Herstellung des Mikrospiegels 58
4.1.1 Mikrospiegelsystem aus Silizium.....58
4.1.2 Ultrapräzisionsbearbeitung.....63
4.2 Monolithischer Mikrospiegel.....67
4.3 Vervielfältigung.....69
4.3.1 Heißprägeprozess 69
4.3.2 Sputterprozess.....72
4.4 Komponenten des Versuchsaufbaus.....73
4.4.1 Lichtwellenleiter.....74
4.4.2 Eingangsoptik.....76
4.4.3 Strahlteiler.....77
4.4.4 Referenzspiegel.....78
4.4.5 Mikrospiegel.....79
4.4.6 CCD-Kamera.....81
5 Spektralmessungen.....84
5.1 Kalibrierung der Wellenlänge.....84
5.1.1 Bildaufnahme- und vorverarbeitung.....84
5.1.2 Korrektur störender Einflussfaktoren.....87
5.1.3 Einfluss der Strahldivergenz.....88
5.1.4 Stitchingprozess.....94
5.2 Korrektur der Intensität.....99
5.3 Messungen unterschiedlicher Spektren.....99
5.4 Spektren von Gasentladungslampen.....103
5.4.1 Natriumdampflampe.....103
5.4.2 Quecksilberdampflampe.....105
5.4.3 Leuchtdioden.....108

5.4.4 Laserdioden und -module.....110
5.5 Breitbandige Lichtquellen.....111
6 Zusammenfassung.....113
7 Literaturverzeichnis.....115

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Konfokal-chromatischer Sensor
Abb. 2.2: *Czerny-Turner*-Anordnung
Abb. 2.3: Marktpotential von Mikrospektrometern

Abb. 3.1: Grafische Herleitung der DFT
Abb. 3.2: Aliasing-Effekt bei Verletzung des Shannon-Nyquist-Abtasttheorems
Abb. 3.3: Auswirkung der zeitbegrenzten Signalaufnahme
Abb. 3.4: Auswirkungen des Leakage-Effekts
Abb. 3.5: Hamming-Fensterfunktion
Abb. 3.6: Auswirkung der Fensterfunktion auf das Zeitsignal
Abb. 3.7: Elektromagnetische Welle
Abb. 3.8: Elektromagnetisches Spektrum
Abb. 3.9: Folge von harmonischen Wellenzügen
Abb. 3.10: Spektrales Auflösungsvermögen nach dem Rayleigh-Kriterium
Abb. 3.11: Strahlengang durch ein Prisma
Abb. 3.12: Schematischer Aufbau eines Prismenspektrometers
Abb. 3.13: Entstehung von Interferenzen am Reflexionsgitter
Abb. 3.14: Winkelverteilung des sichtbaren Spektrums am Beugungsgitter
Abb. 3.15: Echelle-Reflexionsgitter
Abb. 3.16: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers
Abb. 3.17: Detektorsignale mono- und polychromatischer Quellen
Abb. 3.18: Intensität, Interferogramm und Spektrogramm
Abb. 3.19: Aufbau eines statischen Michelson-Interferometers mit gekipptem Spiegel
Abb. 3.20: Entstehung des Interferenzstreifenmusters bei gekipptem Spiegel
Abb. 3.21: Einflussgrößen auf den Kontrast eines SFT-Spektrometers
Abb. 3.22: Auswirkung des integrierenden Detektors
Abb. 3.23: Auswirkung des Füllfaktors
Abb. 3.24: SFT-Spektrometer nach dem Polarisationsprinzip
Abb. 3.25: Sagnac-Interferometer in Dreiecksanordnung
Abb. 3.26: Interferometer mit Hilfe eines Lloyd-Spiegels
Abb. 3.27: Michelson-Interferometer

Abb. 4.1: Schleif-Läpp-Vorrichtung gerüstet mit Zinnschleifscheibe
Abb. 4.2: Werkzeug für den Oberflächenbearbeitungsprozess
Abb. 4.3: Weißlichtinterferometeraufnahme der Silizium-Plättchen
Abb. 4.4: Interferenzstreifenmuster der Silizium-Plättchen
Abb. 4.5: Einteilung spanender Bearbeitungsschritte nach ihrer Bearbeitungsgenauigkeit
Abb. 4.6: Weißlichtinterferometrische Messung auf einer Stufe
Abb. 4.7: Messung mit dem konfokalen Mikroskop
Abb. 4.8: Heißprägeanlage HEX03 im Reinraum
Abb. 4.9: Versuchsaufbau SFT-Spektrometer
Abb. 4.10: Stufenindexfaser zur Lichtführung
Abb. 4.11: Akzeptanzwinkel und Totalreflexion
Abb. 4.12: Dämpfungskennlinie Polymer-optischer Lichtwellenleiter
Abb. 4.13: Achromat
Abb. 4.14: Reflexion in Abhängigkeit der Wellenlänge
Abb. 4.15: Transmissionsrate des Strahlteilers
Abb. 4.16: Reflexionsrate des Planspiegels
Abb. 4.17: Ultrapräzisionsgefräster Mikrospiegel
Abb. 4.18: Reflexionsrate von Kupfer und Messing
Abb. 4.19: Gemessene Reflexionskurve des Mikrospiegels aus Messing
Abb. 4.20: Quanteneffizienz der eingesetzten Kamera
Abb. 4.21: Modellierte Kennlinie der Gerätefunktion

Abb. 5.1: Interferenzbild zweier Laser
Abb. 5.2: Hintergrundbilder bei Blockierung jeweils eines Strahlengangs
Abb. 5.3: Interferenzbild eines einzelnen Lasers
Abb. 5.4: Zemax-Simulation
Abb. 5.5: Zemax-Simulationsmodell
Abb. 5.6: Zemax-Simulation: kollimierte Lichtquelle
Abb. 5.7: Zemax-Simulation: divergente Lichtquelle
Abb. 5.8: Korrektur der Streifenkrümmung und Periodenlänge
Abb. 5.9: Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Bildposition
Abb. 5.10: Korrektur der Streifenkrümmung und Periodenlänge
Abb. 5.11: Source- und sample-Anteil beim Stitchen
Abb. 5.12: Stitching durch Korrelation zweier Stufen
Abb. 5.13: Gestitchtes Interferogramm
Abb. 5.14: Spektrum der zwei Kalibrierlaser

Abb. 5.15: Original- und vorverarbeitetes Interferenzbild
Abb. 5.16: Gestitchtes Interferogramm einer Quecksilberdampflampe
Abb. 5.17: Betragsfunktion der FFT verschiedener Fensterfunktionen
Abb. 5.18: Berechnetes Spektrum einer Natriumdampflampe
Abb. 5.19: Einfluss der Fensterfunktion auf die Halbwertsbreite
Abb. 5.20: Berechnetes Spektrum einer Quecksilberdampflampe
Abb. 5.21: Spektren und Halbwertsbreiten verschiedener LEDs
Abb. 5.22: Interferenz einer roten LED bei Verwendung der Mikrospiegel-Kopie
Abb. 5.23: Berechnete Spektren eines Lasermoduls und einer Laserdiode
Abb. 5.24: Spektren breitbandiger Lichtquellen

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1: Übersicht der Koordinaten bei hard- und softwareseitiger Variation
Tab. 5.2: Auflösungen in Abhängigkeit der verwendeten Fensterfunktion
Tab. 5.3: Dominante Wellenlängen des Quecksilberspektrums
Tab. 5.4: Wellenlängen und Halbwertsbreiten verschiedener LEDs

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

FTS	Fourier-Transformations-Spektrometer
SFTS	statisches Fourier-Transformations-Spektrometer
CCD	charge-coupled device, ladungsgekoppeltes Bauteil
DFT	diskrete Fouriertransformation
FFT	Fast Fourier Transformation
VIS	visible; sichtbarer Anteil der elektromag. Strahlung
FWHM	full width at half maximum; Halbwertsbreite
RGB	Grundfarben: rot, grün, blau
PC	Polycarbonat; Kunststoff
PMMA	Polymethylmethacrylat; thermoplastischer Kunststoff
LED	light emitting diode; Leuchtdiode

Formelzeichen

λ	Wellenlänge
$\Delta\lambda$	Auflösung, Differenz zweier Wellenlängen
$x_T(t)$	zeitkontinuierliche, periodische Funktion
ω_0	Grundfrequenz
$\underline{X}$	komplexer Gewichtungsfaktor
T	Basisperiode
$\delta(t-k\Delta t)$	verschobener Dirac-Impuls
N	Abtastwerte
$\tilde{X}$	diskrete Fouriertransformierte
$\tilde{x}(k)$	diskrete, inverse Fouriertransformierte
f_{max}	maximale Signal-Frequenz
f_A	Abtastfrequenz
$w(n)$	Gewichtung
c, c_0	Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum)
ν	Frequenz
S	Energiestromdichte, Interferenzstreifenperiode
I	Intensität
ε	Permittivität, dielektrische Leitfähigkeit
E	elektrische Feldstärke
$\hat{E}$	Amplitude der elektrischen Feldstärke
τ_i	Lebensdauer eines Wellenzugs
l_c	Kohärenzlänge
A	spektrales Auflösungsvermögen
n	Brechungsindex
δ	Ablenkungswinkel
D_{Wp}	Winkeldispersion
B	Prismenbasis, Kantenlänge
α_e	Einfallswinkel
α_a	Ausfallswinkel
m	Beugungsordnung
g	Gitterkonstante
$\Delta\lambda_F$	freier Spektralbereich

D_{Wg}	Winkeldispersion optisches Gitter
B_{spalt}	Breite Eintrittsspalt
V	Abbildungsverhältnis
l	Brennweite Kollimationsoptik
L	Abstand verschiebbarer Spiegel-Strahlteiler
$E(x,t)$	eindimensionale, elektromagnetische Welle
$k=2\pi/\lambda$	normierte Kreiswellenzahl
δ	optische Weglängendifferenz
$\Delta\Phi$	Phasenverschiebung
$F(\delta)$	Interferogramm
$B(\tilde{\upsilon})$	Spektrum
$\tilde{\upsilon}$	normierte Wellenzahl
φ	Kippwinkel
Θ	Divergenzwinkel, Einfallswinkel, Akzeptanzwinkel
h	Blendendurchmesser
a	Abtastweite
s	lichtsensitive Kantenlänge eines Pixel
F	Füllfaktor
K	Kontrast
R	Radius
R_a	arithmetischer Rauheitswert
T_G	Glasübergangstemperatur
$G(\lambda)$	Gerätefunktion
$R_R(\lambda)$	Reflexionsrate Referenzspiegel
$R_M(\lambda)$	Reflexionsrate Mikrospiegel
$QE_{CCD}(\lambda)$	Quanteneffizienz CCD-Chip
ω_s	Schwebungsfrequenz